

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: **2001311974 A**

(43) Date of publication of application: **09.11.01**

(51) Int. Cl.

G02F 1/377
H01S 5/024

(21) Application number: **2000130795**

(22) Date of filing: **28.04.00**

(71) Applicant: **FUJI PHOTO FILM CO LTD**

(72) Inventor: **SONODA SHINICHIRO**

(54) **WAVELENGTH CONVERSION ELEMENT,
MANUFACTURING METHOD THEREFOR, AND
WAVELENGTH CONVERSION MODULE**

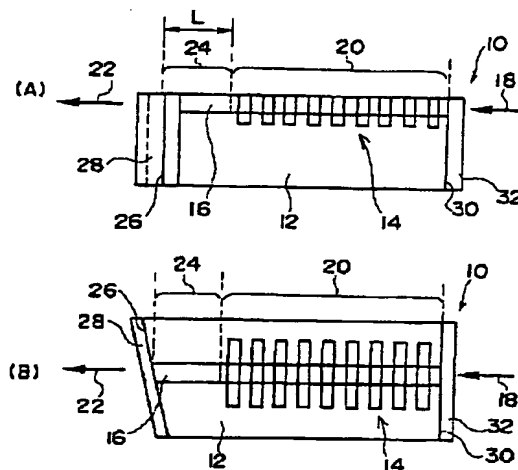
efficiency.

COPYRIGHT: (C)2001,JPO

(57) Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical wavelength conversion element which permits to stably obtain a Gaussian beam form wavelength-converted wave, and has high wavelength conversion efficiency.

SOLUTION: In the optical wavelength conversion element 10 wherein a cyclic domain inversion structure 14 and a channel optical waveguide 16 extending along the cyclic domain inversion structure 14 on a substrate 12 made of a non-linear optical crystal, the incident light side of the channel optical waveguide 16 is used as a 1st area 20 for converting the wavelength into a 2nd higher harmonic wave 22 by pseudo phase matching while propagating an incident fundamental wave 18 in a single mode, and the outgoing light side is used as a 2nd area 24 for propagating a 2nd higher harmonic wave 22 propagated from the 1st area 20 in a single mode. In such a manner, it is possible to stably obtain the 0-order mode 2nd higher harmonic wave 22 of a Gaussian beam form with high wavelength conversion



Title of the Prior Art

Japanese Published Patent Application No.2001-311974

Date of Publication: November 9, 2001

Concise Statement of Relevancy

Translation of Paragraph [0069]

The light which was not converted from the second region to the first region at the bonding part between the second region and the first region is irradiated into space or within the wavelength converting element. This irradiated light becomes a stray light, and overlaps with the light to be actually used. Thus conventionally, when imaging light irradiated from the wavelength converting element through a lens, an unnecessary portion generated by the stray light was cut out by an aperture. However, when the bonding part and the facet of the element are too close to each other, there arises a problem that the beam is not separated and the stray light is offset. The level of the stray light indicates the degree of the offset. When the level of the stray light is larger than -10 dB, i.e., the length L of the second region is less than 0.5 mm, there are too many offsets of the stray lights, being not practically preferable. However, if the length of the second region is selected so that the level of the stray light has no practical problem, an aperture is not necessitated.

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-311974

(P2001-311974A)

(43)公開日 平成13年11月9日(2001.11.9)

(51)Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テマコード*(参考)

G 0 2 F 1/377

G 0 2 F 1/377

2 K 0 0 2

H 0 1 S 5/024

H 0 1 S 5/024

5 F 0 7 3

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 13 頁)

(21)出願番号 特願2000-130795(P2000-130795)

(22)出願日 平成12年4月28日(2000.4.28)

(71)出願人 000005201

富士写真フイルム株式会社

神奈川県南足柄市中沼210番地

(72)発明者 園田 慎一郎

神奈川県足柄上郡開成町宮台798番地 富

士写真フイルム株式会社内

(74)代理人 100079049

弁理士 中島 淳 (外3名)

Fターム(参考) 2K002 AB12 BA01 CA03 DA06 EA01

EA03 EA23 FA27 GA10 HA20

5F073 AA67 AA83 AB23 AB27 AB29

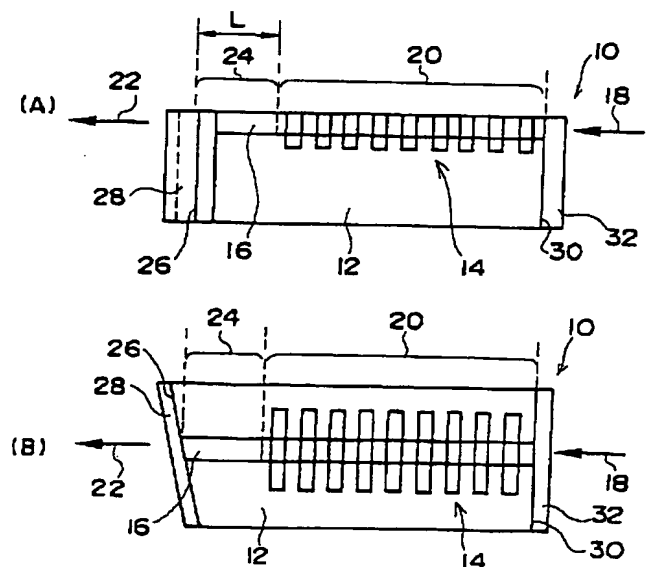
FA25 FA29

(54)【発明の名称】 波長変換素子、波長変換素子の製造方法、及び波長変換モジュール

(57)【要約】

【課題】安定してガウシアンビーム状の波長変換波が得られ、しかも波長変換効率の高い光波長変換素子を提供する。

【解決手段】非線形光学結晶からなる基板12上に、周期ドメイン反転構造14と、この周期ドメイン反転構造14に沿って延びるチャンネル光導波路16とが形成された光波長変換素子10において、チャンネル光導波路16の光入射側を、入射された基本波18をシングルモードで伝搬しながら擬似位相整合により第2高調波22に波長変換する第1の領域20とし、光出射側を第1の領域20から伝搬された第2高調波22をシングルモードで伝搬する第2の領域24とする。これにより、高い波長変換効率で、安定してガウシアンビーム状の0次モードの第2高調波22を得ることができる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】入射された基本波をシングルモードで伝搬しながら擬位相整合により波長変換する第 1 の領域と、

該第 1 の領域から伝搬された波長変換波をシングルモードで伝搬して出射する第 2 の領域と、
を含む波長変換素子。

【請求項 2】前記第 2 の領域と周囲との屈折率差が、前記第 1 の領域と周囲との屈折率差よりも小さい請求項 1 に記載の波長変換素子。

【請求項 3】前記第 1 の領域及び第 2 の領域が、非線形結晶基板に形成された直線状の光導波路により構成されている請求項 1 または 2 に記載の波長変換素子。

【請求項 4】前記第 2 の領域の光伝搬方向に沿った長さが 0.5 mm 以上である請求項 1 ～ 3 のいずれか 1 項に記載の波長変換素子。

【請求項 5】前記非線形結晶が LiNbO_{3-x} ($0 \leq x \leq 1$) である請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載の波長変換素子。

【請求項 6】前記非線形結晶に MgO 、 ZnO 、または Sc がドーパされた請求項 1 ～ 5 のいずれか 1 項に記載の波長変換素子。

【請求項 7】出射側端面が光軸方向に垂直な面に対して光伝搬方向に $3^\circ \sim 7^\circ$ 傾斜した請求項 1 ～ 6 のいずれか 1 項に記載の波長変換素子。

【請求項 8】基本波に対する反射率が 0.2 % 以上の反射防止膜を、入射側端面及び出射側端面の少なくとも一方に設けた請求項 1 ～ 7 のいずれか 1 項に記載の波長変換素子。

【請求項 9】請求項 1 に記載の波長変換素子を製造する波長変換素子の製造方法であって、
前記非線形結晶基板の前記第 1 の領域に対応する領域に所定深さの第 1 のプロトン交換領域を形成し、前記第 2 の領域に対応する領域に前記第 1 の領域よりも浅い第 2 のプロトン交換領域を形成し、
前記第 1 のプロトン交換領域をアニールした後に分極反転構造を形成して、入射された基本波をシングルモードで伝搬可能であると共に、擬位相整合により基本波を波長変換波に変換可能な第 1 の領域を形成し、
前記第 2 のプロトン交換領域をアニールして、前記第 1 の領域から伝搬された波長変換波をシングルモードで伝搬可能な第 2 の領域を形成し、
波長変換素子を製造する波長変換素子の製造方法。

【請求項 10】請求項 1 ～ 8 のいずれか 1 項に記載の波長変換素子と、基本波を出射する半導体レーザとを直接結合した光波長変換モジュール。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波長変換素子、波長変換素子の製造方法、及び波長変換モジュールに関す

る。

【0002】

【従来の技術及び発明が解決しようとする課題】従来、非線形光学材料からなる光導波路を有し、この光導波路を伝搬する基本波を第 2 高調波等に波長変換する導波路型の光波長変換素子が知られている。また、この種の導波路型の光波長変換素子においては、光導波路に周期ドメイン反転構造を形成して、いわゆる擬位相整合を取ることが広く行なわれている。この導波路型の光波長変換素子から出射した第 2 高調波等の波長変換波を、レーザプリンタ等の光走査記録装置の記録光として適用する場合等においては、記録光をより小さなスポットに絞るために、波長変換波はガウシアンビーム、つまりビーム断面内の光強度分布がガウス分布となっているビームであるのが望ましい。また、記録光がガウシアンビームになっていないと、記録濃度にムラが生じやすい。さらに、赤色、緑色、青色の 3 色の記録光でカラー画像を記録する際に、ある記録光だけがガウシアンビームになっていないと、色ずれが生じてしまう。

【0003】上述のように波長変換波をガウシアンビームとするためには、導波路型の光波長変換素子を、その光導波路において 0 次モードで伝搬する波長変換波と基本波とが位相整合するように構成すればよい。

【0004】その一方、本発明者の研究によると、0 次モードよりも 1 次モードで伝搬する第 2 高調波の方が基本波との重なり積分が大きくなることが分かっている。従って波長変換効率の点からは、1 次モードで伝搬する第 2 高調波と基本波とが位相整合するように導波路型光波長変換素子を構成することが望まれる。しかしながら、光導波路を 1 次モードで伝搬して光導波路外に出射した第 2 高調波は、垂直方向（光導波路の基板厚さ方向）にローブが 2 つ並んだ形の強度分布を有し、ガウシアンビームにはならない。

【0005】特開平 8-54658 号には、光導波路を 1 次モードで伝搬してから光導波路外に出射した第 2 高調波を位相補償板に通すことにより、上記 2 つのローブ間の位相差を補償して、第 2 高調波をガウシアンビーム化する技術が示されている。しかしながら、その場合には、ビーム端部に位相が安定しないエッジだれが生じたり、光導波路の作製ばらつきが存在することから、2 つのビーム間の位相差が安定せず、そのため条件が固定されている位相補償板を用いたのでは、安定したガウシアンビームを得るのは困難となっている。

【0006】また、特開平 11-72810 号公報には、外部に光学素子を設けることなく通常的光導波路上に高屈折率クラッド層を設けて 0 次モードで伝搬する第 2 高調波と基本波とのオーバーラップを増大させ、高い変換効率で第 2 高調波を得る光導波路が記載されている。しかしながら、この光導波路では出射した第 2 高調波は横方向がマルチモードとなり、安定してガウシアンビー

ムを得ることができない、という問題がある。この光導波路において横方向がマルチモードとなるのは、0次モードで伝搬する第2高調波と基本波の波長分散（導波路の構造分散と材料の分散）のために、縦方向及び横方向が共にシングルモードとなる光導波路を得ることができないからである。

【0007】なお、0次モードの第2高調波と基本波とは、通常は横方向の重なりが大きく、光導波路において0次モードで伝搬する波長変換波と基本波とが位相整合するように構成すればガウシアンビームが得られるが、横方向のビームが複数のピークを持つ高次モードとなる場合がある。これは光導波路中の欠陥等によるモード変換が原因と推定されている。

【0008】本発明は上記事情に鑑み成されたものであり、本発明の目的は、安定してガウシアンビーム状の波長変換波が得られ、しかも波長変換効率の高い光波長変換素子を提供することにある。

【0009】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、請求項1に記載の波長変換素子は、入射された基本波をシングルモードで伝搬しながら擬似位相整合により波長変換する第1の領域と、該第1の領域から伝搬された波長変換波をシングルモードで伝搬して出射する第2の領域と、を含んで構成したことを特徴とする。

【0010】本発明の光波長変換素子では、第1の領域において、入射された基本波をシングルモードで伝搬しながら擬似位相整合により第2高調波に波長変換すると共に、第2の領域において、この第1の領域から伝搬された波長変換波である第2高調波をシングルモードで伝搬して、波長変換波を出射することとしたので、光導波路中に欠陥等がある場合にも、高い波長変換効率で、安定してガウシアンビーム状の波長変換波を得ることができる。

【0011】請求項2に記載の波長変換素子は、請求項1に記載の発明において、前記第2の領域と周囲との屈折率差が、前記第1の領域と周囲との屈折率差よりも小さいことを特徴とする。なお、「周囲との屈折率差」とは、各領域と各領域に隣接する領域（但し、第1の領域の場合は第2の領域を除き、第2の領域の場合は第1の領域を除く）との屈折率差のことである。

【0012】請求項3に記載の波長変換素子は、請求項1または2に記載の発明において、前記第1の領域及び第2の領域が、非線形結晶基板に形成された直線状の光導波路により構成されていることを特徴とする。

【0013】請求項4に記載の波長変換素子は、請求項1～3のいずれか1項に記載の発明において、前記第2の領域の光伝搬方向に沿った長さが0.5mm以上であることを特徴とする。前記第2の領域の光伝搬方向に沿った長さを0.5mm以上とすることにより、迷光がオフセットするのを防止することができる。

【0014】請求項5に記載の波長変換素子は、請求項1～4のいずれか1項に記載の発明において、前記非線形結晶が $\text{LiNbO}_{3-x}\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) であることを特徴とする。

【0015】請求項6に記載の波長変換素子は、請求項1～5のいずれか1項に記載の発明において、前記非線形結晶に MgO 、 ZnO 、または Sc がドーピングされたことを特徴とする。

【0016】請求項7に記載の波長変換素子は、請求項1～6のいずれか1項に記載の発明において、出射側端面が光軸方向に垂直な面に対して光伝搬方向に $3^\circ \sim 7^\circ$ 傾斜したことを特徴とする。出射側端面をこのように斜めに研磨したことにより、基本波が波長変換素子に再入射するのを防止することができる。

【0017】請求項8に記載の波長変換素子は、請求項1～7のいずれか1項に記載の発明において、基本波に対する反射率が0.2%以上の反射防止膜を、入射側端面及び出射側端面の少なくとも一方に設けたことを特徴とする。

【0018】請求項9に記載の波長変換素子の製造方法は、請求項1に記載の波長変換素子を製造する波長変換素子の製造方法であって、前記非線形結晶基板の前記第1の領域に対応する領域に所定深さの第1のプロトン交換領域を形成し、前記第2の領域に対応する領域に前記第1の領域よりも浅い第2のプロトン交換領域を形成し、前記第1のプロトン交換領域をアニールした後に分極反転構造を形成して、入射された基本波をシングルモードで伝搬可能であると共に、擬似位相整合により基本波を波長変換波に変換可能な第1の領域を形成し、前記第2のプロトン交換領域をアニールして、前記第1の領域から伝搬された波長変換波をシングルモードで伝搬可能な第2の領域を形成し、波長変換素子を製造することを特徴とする。本発明の波長変換素子の製造方法では、入射された基本波をシングルモードで伝搬しながら擬似位相整合により波長変換する第1の領域と、この第1の領域から伝搬された波長変換波をシングルモードで伝搬して出射する第2の領域とを、2回のプロトン交換とアニールとにより形成することができ、本発明の波長変換素子を容易に製造することができる。

【0019】請求項10に記載の波長変換モジュールは、請求項1～8のいずれか1項に記載の波長変換素子と、基本波を出射する半導体レーザとを直接結合したことを特徴とする。本発明の光波長変換モジュールは、上記した本発明の光波長変換素子を用いているので、外部に位相補償板等の光学素子を設けることなく、高い波長変換効率で、安定してガウシアンビーム状の波長変換波を得ることができる。また、外部に光学素子を設ける必要がないので、モジュールの信頼性が向上すると共に、コストダウンを図ることができる。

50 【0020】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して、本発明の実施の形態について詳細に説明する。

(第1の実施の形態) まず、本発明の光波長変換素子の実施の形態について詳細に説明する。図1(A)及び

(B)に示すように、本実施の形態の光波長変換素子10は、非線形光学結晶からなる基板12上に、そのz軸と平行な自発分極の向きを反転させたドメイン反転部が周期的に形成されてなる周期ドメイン反転構造14と、この周期ドメイン反転構造14に沿って延びるチャンネル光導波路16とが形成されたものである。

【0021】基板12を構成する非線形光学結晶としては、例えば、 LiNbO_3 ($0 \leq x \leq 1$) 等の非線形光学結晶、及びこの非線形光学結晶に MgO 、 ZnO 、または Sc がドーピングされた結晶を用いることができる。

【0022】周期ドメイン反転構造14は、基板12のy軸方向にドメイン反転部が並ぶように所定周期 Λ で形成されている。その周期 Λ は、非線形光学結晶の屈折率の波長分散を考慮して、基本波近辺の波長に対して1次の周期となるように決定されている。このような周期ドメイン反転構造14は、例えば特開平6-242478号に記載された方法によって形成することができる。

【0023】チャンネル光導波路16は、基本波18が入射する光入射側が周囲との屈折率差が Δn_1 の第1の領域20とされ、波長変換波としての第2高調波22が出射する光出射側が周囲との屈折率差が Δn_2 の第2の領域24とされている。なお、第1の領域20の「周囲との屈折率差」とは、第1の領域20と空気層及び基板12との屈折率差のことであり、第2の領域24の「周囲との屈折率差」とは、第2の領域24と空気層及び基板12との屈折率差のことである。

【0024】ここで、第2の領域24の周囲との屈折率差 Δn_2 は、第1の領域20の屈折率差 Δn_1 よりも小さく、第1の領域20の周囲との屈折率差 Δn_1 は入射された基本波18をシングルモードで伝搬可能な値とされ、第2の領域24の周囲との屈折率差 Δn_2 は第1の領域20から伝搬された第2高調波22をシングルモードで伝搬可能な値とされている。また、第2の領域24の光の伝搬方向に沿った長さLは、迷光を低減するためにある程度の長さが必要であり、0.5mm以上が好ましく、0.75mm以上がより好ましい。

【0025】また、光波長変換素子10の両端面は光学研磨されている。特に、光波長変換素子10の出射側端面26は斜めに研磨されて、チャンネル光導波路16が延びる方向に垂直な面に対して、チャンネル光導波路16が延びる方向に角度 θ ($3^\circ \leq \theta$) 以上傾斜した傾斜面が形成されている。出射側端面26をこのように斜めに研磨したことにより、基本波がチャンネル光導波路16に再入射するのを防止することができる。そして、光波長変換素子10の出射側端面26には、基本波に対す

る反射率が0.2%以上のAR(反射防止)コート28が設けられている。また、入射側端面30にも、基本波に対する反射率が0.2%以上のARコート32が設けられている。

【0026】次に、上記光波長変換素子10の製造方法について説明する。まず、図2(A)及び(B)に示すように、フォトリソグラフィ、金属(例えば、Cr)蒸着、及びリフトオフを用いて、光学結晶基板(例えば87°Zカットの $\text{MgO}5\text{mol}\%$ ドーピングの LiNbO_3 基板)12に、所定構造の分極反転用電極34を形成する。なお、分極反転用電極34の詳細な構造は、特開平9-218431号公報に記載されている。

【0027】次に、図3(A)及び(B)に示すように、フォトリソグラフィ、スパッタ成膜、及びリフトオフを用いて、分極反転用電極34が形成された基板12上に所定幅の直線状の開口38を有する金属マスク36を形成する。なお、金属マスク36は、例えば、下層からTa層36A、Au層36B、及びTa層36Cの順に積層された3層構造とされている。また、開口38の線幅は3~9 μm の範囲で一定とする。

【0028】次に、図4(A)及び(B)に示すように、この金属マスク36を用いて第1回目のプロトン交換処理を行うことにより、プロトン交換部39Aを形成する。第1回目のプロトン交換処理の条件は、ピロリン酸中で140~160℃の温度範囲で15~60分である。

【0029】次に、図5(A)及び(B)に示すように、フォトリソグラフィ、スパッタ成膜、及びリフトオフを用いて、プロトン交換部39Aの出射部近傍のTa層36C上の所定範囲に金属マスク40を形成する。図6(A)及び(B)に示すように、この金属マスク40を用いて第2回目のプロトン交換処理を行うことにより、プロトン交換部39Aの光入射側をより深い部分までプロトン交換してプロトン交換部39Bを形成する。第2回目のプロトン交換の条件は、ピロリン酸中で140~160℃の温度範囲で60~200分である。

【0030】次に、図7(A)及び(B)に示すように、エッチングによりTa層36Cを除去してAu層36Bを露出させた後に大気中でアニール処理を行い、プロトン交換部39A及び39Bをチャンネル光導波路16とする。なお、アニール処理は300~400℃の温度範囲で60分の条件で行う。これにより深いプロトン交換部39Bが形成された光入射側には、周囲との屈折率差 Δn_1 の第1の領域20が形成され、より浅いプロトン交換部39Aが形成された光出射側には、周囲との屈折率差 Δn_2 ($\Delta n_1 > \Delta n_2$) の第2の領域24が形成される。なお、アニールによりチャンネル光導波路16の第1の領域20と第2の領域24とは略同じ厚さとなる。

【0031】なお、上記2回のプロトン交換処理の条件

及びアニール処理の条件は、第1の領域20の周囲との屈折率差 Δn_1 が、入射された基本波18をシングルモードで伝搬可能な値となり、第2の領域24の周囲との屈折率差 Δn_2 が、第1の領域20から伝搬された第2高調波22をシングルモードで伝搬可能な値となるように適宜選択される。また、第2高調波への変換効率や半導体レーザとの結合効率が最大となるように、プロトン交換処理の条件及びアニール処理の条件を選択することが好ましい。

【0032】次に、図8(A)及び(B)に示すように、エッチングにより残りの金属マスクを総て除去して分極反転用電極34を露出させ、分極反転用電極34に高電圧を印加する。例えば、電極間ギャップが $400\mu\text{m}$ のときに2~4kVの電圧を1~10秒印加する。これにより基板12に周期ドメイン反転構造14が形成される。

【0033】次に、光導波路端面を含む基板12の両端面を光学研磨する。なお、出射側端面26は、基本波が再入射するのを防止するために、光軸方向に垂直な面に対して光伝搬方向に所定角度傾斜した傾斜面が形成されるように研磨(以下、「斜めカット」と称する)する。なお、傾斜角度は3~7°とすることができる。最後に、入射側端面30及び出射側端面26に、基本波に対する反射率が0.2%以下となるように、 SiO_2 単層からなるARコート28、32をそれぞれ形成して、図1に示す光波長変換素子10が完成する。

【0034】上述の光波長変換素子10のチャンネル光導波路16の入射側端面30に、半導体レーザを直接結合して、上記光波長変換素子10内に、例えば950nmのレーザビームを基本波18として入射させると、基本波18は第1の領域20を0次モードで伝搬し、第1の領域20中の周期ドメイン反転構造14で位相整合(いわゆる疑似位相整合)されて、例えば波長が約475nmの第2高調波22に変換される。なお、周期ドメイン反転構造14の周期 Λ は、基本波18と0次モードで伝搬する第2高調波22との間で疑似位相整合が取られるように設定されている。具体的には、チャンネル光導波路16の基本波18に対する実効屈折率、第2高調波22に対する実効屈折率をそれぞれ n_ω 、 $n_{2\omega}$ とし基本波の波長を λ_F としたとき、下記の式

$$n_{2\omega} - n_\omega = \lambda_F / 2\Lambda$$

と満足するように周期 Λ を決定すればよい。

【0035】第1の領域20から第2の領域24に伝搬された第2高調波22は、第2の領域を0次モードで伝搬して、例えば30mW以上の波長約475nmの青色光が出射側端面26から発散光状態で出射する。このとき出射した第2高調波22のNFP(ニアフィールドパターン)における基板と垂直な方向のビーム形状を図9(A)に実線で示し、基板と水平な方向のビーム形状を破線で示す。また、図9(B)には、通常のチャンネル

光導波路を1次モードで伝搬した後に射出した第2高調波のNFPにおけるビーム形状を示す。図9(A)と同様に、基板と垂直な方向のビーム形状を実線で示し、基板と水平な方向のビーム形状を破線で示す。図9(A)及び(B)を比較すれば分かるように、チャンネル光導波路を1次モードで伝搬した後に射出した第2高調波のNFPはサイドローブを有しているのに対し、第2の領域を0次モードで伝搬した後に射出した本実施の形態の第2高調波のNFPは、サイドローブが無いガウス分布を示した。

【0036】また、第1の領域20での基本波18(0次モード)から第2高調波22(0次モード)への変換効率は、基本波18(0次モード)から第2高調波22(1次モード)への変換効率の10~20%となる。例えば、第2高調波22(1次モード)への変換の場合であれば300%/W cm^2 となるところが、第2高調波22(0次モード)への変換の場合は30~60%/W cm^2 となる。一方、第1の領域20から第2の領域24に入射する際に、第2高調波22を1次モードから0次モードへモード変換する必要があるため10~70%の範囲のモード変換ロスが発生する。即ち、第1の領域20において、基本波18(0次モード)から第2高調波22(1次モード)へ変換し、第2の領域24において、第2高調波22を1次モードから0次モードへモード変換する場合には、第1の領域20に入射した基本波18(0次モード)を30~90%の変換効率で0次モードの第2高調波にし、第2の領域24から射出させることになる。従って、基本波18(0次モード)から直接第2高調波22(0次モード)へ変換して射出する場合に比べ、全体として1.5倍から9倍の変換効率を得ることができる。

【0037】なお、第1の領域20を伝搬する光のビーム形状を第2の領域24を伝搬する光のビーム形状と一致させることで、モード変換ロスを約10%程度まで低減することができる。

【0038】以上の通り、本実施の形態の光波長変換素子では、チャンネル光導波路を第1の領域と第2の領域とに分けて、第1の領域において、入射された基本波をシングルモードで伝搬しながら疑似位相整合により第2高調波に波長変換すると共に、第2の領域において、この第1の領域から伝搬された波長変換波である第2高調波をシングルモードで伝搬して、0次モードの第2高調波を取出すこととしたので、光導波路中に欠陥等がある場合にも、高い変換効率でガウシアンビームを得ることができる。

【0039】上記実施の形態では、チャンネル光導波路の幅は、第1の領域及び第2の領域において同じ幅としたが、異なる幅とすることもできる。例えば、図10(A)に示すように、第2の領域24の幅を第1の領域20の幅より狭くする態様、図10(B)に示すよう

に、第2の領域24の幅を第1の領域20の幅より広くする態様、図10(C)に示すように、第2の領域24の幅を出射側に向けてテーパ状に狭める態様等が挙げられる。しかしながら、異なる幅とする場合にはマスク形成時に正確なアラインメントが必要になり製造工程が煩雑となるため、第1の領域及び第2の領域においてチャンネル光導波路の幅を同じ幅とする態様が好ましい。

(第2の実施の形態) 次に、上記波長変換素子を用いた光波長変換モジュールの実施の形態について説明する。この光波長変換モジュールは、図11に示すように、後方出射端面とこの端面に対向する前方出射端面とを備えた半導体レーザ110と、半導体レーザ110の前方出射端面と共に外部共振器を構成する反射部材としてのミラー112と、半導体レーザ110から出射された基本波を波長変換して第2高調波を出力する上記光波長変換素子10と、を備えている。

【0040】半導体レーザ(LD)110は半導体レーザ用のマウント116に保持され、2次高調波発生素子(SHG素子)で構成された光波長変換素子10は光波長変換素子用のマウント118に保持されている。半導体レーザ110と光波長変換素子10とは、マウントに保持された状態で、半導体レーザ110の出射部分と光波長変換素子10の導波路部分(入射部分)とが一致するように位置合わせされ、LD-SHGユニット120が構成されている。これにより半導体レーザ110の前方出射端面に光波長変換素子10が直接結合される。このLD-SHGユニット120は、図11に示すように、基板122上に固定されている。

【0041】半導体レーザ110は、ファブリペロー型(FP型)の単峰性の空間モード(横シングルモード)を有する通常の半導体レーザ(レーザダイオード)であり、半導体レーザ110の両端面(劈開面)には、発振波長の光に対するLR(低反射率)コートが施されている。

【0042】図11に示すように、LD-SHGユニット120には、半導体レーザ110の後方出射端面から発散光状態で出射したレーザビーム(後方出射光)134Rを平行光化するコリメータレンズ136が取り付けられている。LD-SHGユニット120及びコリメータレンズ136は、気密封止部材としてのパッケージ138内にドライ窒素等の不活性ガスまたはドライ空気と共に気密封止され、パッケージ138内に固定されている。なお、コリメータレンズ136としては、セルフオック(商品名)のような分布屈折率ロッドレンズ、非球面レンズ、及び球面レンズのいずれをも使用することができる。

【0043】パッケージ138には、半導体レーザ110からの後方出射光134Rが透過する窓孔41Aと光波長変換素子10からの前方出射光62が透過する窓孔41Bとが形成され、この窓孔41Aと窓孔41Bに

は、それぞれ透明な窓板42Aと窓板42Bとが気密状態を保つように被着されている。また、パッケージ138には、ワイヤ取出孔に低融点ガラス等を気密状態で嵌合させたワイヤ取出部44が形成され、半導体レーザ110の両電極に結線された2本のワイヤ46A、46Bがワイヤ取出部44を貫通して引き出されている。そして、パッケージ138は、LD-SHGユニット120とコリメータレンズ136とを気密封止した状態で、ミラー112と共に基板48上に固定されている。

【0044】ミラー112は、そのレーザビーム入射側の面にはARコート50が施され、入射側の面と反対側の面にはHRコート52が施されている。レーザビーム入射側の面にARコートが施され、入射側の面と反対側の面にHRコートが施されたミラーを用いることにより、ゴミの付着によりミラーの反射率が低下するのを防止することができる。

【0045】パッケージ138の窓板42Aとミラー112との間には、ホルダー54に回転可能に保持された波長選択素子としての狭帯域バンドパスフィルタ56と、レーザビーム134Rの光路を略180°折り曲げるための一對の全反射プリズム58A及び58Bと、平行光化されたレーザビーム134Rをミラー112のHRコート52の表面に収束させる集光レンズ60と、がこの順に配置され、基板48上に固定されている。ミラー112のHRコート52の基本波に対する反射率は95%とするのが好ましい。

【0046】ミラー112と半導体レーザ110の前方出射端面とによって構成される外部共振器の共振器長(即ち、半導体レーザ110の前方出射端面からミラー112のHRコート52の表面までの光学長)が、半導体レーザから出射される基本波のコヒーレント長よりも長くなるように、半導体レーザ110とミラー112とが配置されている。基本波のコヒーレント長Lは、そのレーザビーム固有の可干渉距離であり、レーザビームの波長を λ 、スペクトル幅を $\Delta\lambda$ とすると、下記式に従い算出することができる。基本波のコヒーレント長Lは、一般には100mm程度であるので、外部共振器の共振器長を、例えば100mmを超える長さとすることができる。

$$L = \lambda^2 / 2\pi n \Delta\lambda$$

また、パッケージ138の窓板42Bの外側には、光波長変換素子10の前方出射端面から出射した第2高調波62(基本波134を含む)を平行光化するコリメータレンズ64、平行光化された第2高調波62(基本波134を含む)から赤外光成分を除去するIRカットフィルタ66、ハーフミラー68、及びフォトダイオード70が配置され、基板48上に固定されている。コリメータレンズ64としては、収差の少ない非球面レンズが好ましい。

【0048】図12に示すように、基板48は設置台7

2に固定されている。基板48と設置台72との間にはペルチェ素子74が挿入されて、基板48に固定された各光学要素がペルチェ素子74により所定温度に調節される。基板48に固定された各光学要素は、基板48及びペルチェ素子74と共に、レーザビームの出射部分が透明な防塵用カバー75により覆われている。

【0049】また、半導体レーザ110は、防塵用カバー75の外に引出されたワイヤ46A、46Bを介して駆動回路78に接続されている。駆動回路78の概略構成を図13に示す。この駆動回路78は、自動出力制御回路(APC)を備えた直流電源回路80、交流電源84、及びバイアスT88からなり、バイアスT88はコイル82とコンデンサ86とから構成されており、直流電源回路80から発せられてコイル82を経た直流電源成分に、交流電源84から発せられてコンデンサ86を経た高周波が重畳され、この高周波重畳された電流が半導体レーザ110に印加される。出力する第2高調波のノイズを低減するために、重畳される高周波の周波数は100~400MHzとするのが好ましく、変調度は100%とするのが好ましい。

【0050】フォトダイオード70の両電極には2本のワイヤ71A、ワイヤ71Bが結線されており、ワイヤ71A、ワイヤ71Bは、防塵用カバー75の外に引出されている。フォトダイオード70は、防塵用カバー75の外に引出されたワイヤ71A、ワイヤ71Bを介してAPCを備えた直流電源回路80に接続されている。このAPCにより、第2高調波62の光出力が所定値となるように、半導体レーザ110に印加する電流量を制御する。また、ペルチェ素子74は、温度コントローラ90に接続されている。さらに、防塵用カバー75により覆われた装置内部には、装置内の温度を調節するためのサーミスタ(図示せず)が設けられており、このサーミスタも温度コントローラ90に接続されている。温度コントローラ90は、サーミスタの出力に基づいて、装置内部が使用環境で光学系が結露しない温度範囲(例えば、使用環境温度が30℃であれば、30℃以上)に維持されるようにペルチェ素子74を制御する。

【0051】本実施の形態に係る光波長変換モジュールは、第1の実施の形態に係る上記光波長変換素子を用いているので、外部に位相補償板等の光学素子を設けることなく、高い波長変換効率で、安定してガウシアンビーム状の0次モードの第2高調波を得ることができる。また、外部に光学素子を設ける必要がないので、モジュールの信頼性が向上すると共に、コストダウンを図ることができる。

【0052】

【実施例】以下、具体的な実施例について説明する。

(実施例1) 上述した製造方法に従い、まず、87°ZカットのMgO5mol%ドープのLiNbO₃基板に、フォトリソグラフィ、Cr蒸着、及びリフトオフ

を用いて、分極反転用の電極を作成した。電極の詳細な構造は特開平9-218431に開示されている。なお、分極反転グレーティングの長さ、即ち電極長は8mmとした。次に、フォトリソグラフィ、スパッタ成膜、及びリフトオフを用いて、Ta/Au/Taからなる3層構造の金属マスクを形成した。各層の層厚はそれぞれ300Å、1000Å、300Åとし、開口部の線幅は7μmとした。この金属マスクを用いて、ピロリン酸中において140℃、32分の条件で1回目のプロトン交換処理を行った。

【0053】次に、フォトリソグラフィ、スパッタ成膜、及びリフトオフを用いて、出射端から光導波路に沿って1mm内側までの領域に、Ta/Au/Taからなる3層構造の金属マスクを形成した。各層の層厚はそれぞれ300Å、1000Å、300Åとした。この金属マスクを用いて、ピロリン酸中において140℃、176分の条件で2回目のプロトン交換処理を行った。

【0054】次に、上層のTa層をフッ酸と硝酸の混合液(比率1:2)でエッチング除去した後、大気中において350℃、60分間の条件でアニール処理を行った。その後、Au層をKIとIとH₂Oの混合液でエッチング除去した後、Ta層をフッ酸と硝酸の混合液(比率1:2)でエッチング除去した。

【0055】次に、真空中またはフロリナート中で、電極に、電極間ギャップ400μmの時3kVの高電圧を1~10秒間印加して分極反転を行った。得られた波長変換素子の両端を光学研磨した。特に、出射側端面26は基本波が再入射するのを防止するために傾斜角度3~7°の斜めカットとした。最後に、入射側端面30及び出射側端面26に、基本波に対する反射率が0.2%以下になるようにSiO₂単層薄膜からなるARコートを作成した。

【0056】完成した波長変換素子に、半導体レーザを用いて波長950nmのレーザビーム(基本波)を入力すると、18mW以上の波長475nmの青色光(第2高調波)の出力が得られた。第2高調波への変換効率を調べたところ、第1の領域での第2高調波への変換効率は300%/Wcm²であり、第1の領域から第2の領域に入射する際のモード変換ロスが40%である。従って、第1の領域及び第2の領域を通しての第2高調波への変換効率は180%/Wcm²となる。

【0057】また、波長変換素子から出射した第2高調波のNFPにおける基板と垂直な方向のビーム形状は、図9(A)に実線で示すように、ガウス分布を示した。

(実施例2) 上述した製造方法に従い、まず、87°ZカットのMgO5mol%ドープのLiNbO₃基板に、フォトリソグラフィ、Cr蒸着、及びリフトオフを用いて、分極反転用の電極を作成した。電極の詳細な構造は特開平9-218431に開示されている。なお、電極長は8mmとした。次に、フォトリソグラフィ

一、スパッタ成膜、及びリフトオフを用いて、Ta/Au/Taからなる3層構造の金属マスクを形成した。各層の層厚はそれぞれ300Å、1000Å、300Åとし、開口部の線幅は6μmとした。この金属マスクを用いて、ピロリン酸中において150℃、34分の条件で1回目のプロトン交換処理を行った。

【0058】次に、フォトリソグラフィ、スパッタ成膜、及びリフトオフを用いて、出射端から光導波路に沿って1mm内側までの領域に、Ta/Au/Taからなる3層構造の金属マスクを形成した。各層の層厚はそれぞれ300Å、1000Å、300Åとした。この金属マスクを用いて、ピロリン酸中において170℃、53分の条件で2回目のプロトン交換処理を行った。

【0059】次に、上層のTa層をフッ酸と硝酸の混合液（比率1：2）でエッチング除去した後、大気中において370℃、60分間の条件でアニール処理を行った。その後、Au層をKIとIとH₂Oの混合液でエッチング除去した後、Ta層をフッ酸と硝酸の混合液（比率1：2）でエッチング除去した。

【0060】次に、真空中またはフロリナート中で、電極に、電極間ギャップ400μmの時3kVの高電圧を1～10秒間印加して分極反転を行った。得られた波長変換素子の両端を光学研磨した。特に、出射側端面26は基本波が再入射するのを防止するために傾斜角度3～7°の斜めカットとした。最後に、入射側端面30及び出射側端面26に、基本波に対する反射率が0.2%以下になるようにSiO₂単層薄膜からなるARコートを作成した。

【0061】完成した波長変換素子に、半導体レーザを用いて波長950nmのレーザビーム（基本波）を入力すると、20mW以上の波長475nmの青色光（第2高調波）の出力が得られた。第2高調波への変換効率を調べたところ、第1の領域での第2高調波への変換効率は500%/Wcm²であり、第1の領域から第2の領域に入射する際のモード変換ロスが60%である。従って、第1の領域及び第2の領域を通しての第2高調波への変換効率は200%/Wcm²となる。

【0062】また、波長変換素子から出射した第2高調波のNFPにおける基板と垂直な方向のビーム形状は、図9（A）に実線で示すように、ガウス分布を示した。

（実施例3）上述した製造方法に従い、まず、87°ZカットのMgO5mol%ドープのLiNbO₃基板に、フォトリソグラフィ、Cr蒸着、及びリフトオフを用いて、分極反転用の電極を作成した。電極の詳細な構造は特開平9-218431に開示されている。なお、電極長は8mmとした。次に、フォトリソグラフィ、スパッタ成膜、及びリフトオフを用いて、Ta/Au/Taからなる3層構造の金属マスクを形成した。各層の層厚はそれぞれ300Å、1000Å、300Åとし、開口部の線幅は7μmとした。この金属マスクを用

いて、ピロリン酸中において150℃、32分の条件で1回目のプロトン交換処理を行った。

【0063】次に、フォトリソグラフィ、スパッタ成膜、及びリフトオフを用いて、出射端から光導波路に沿って1mm内側までの領域に、Ta/Au/Taからなる3層構造の金属マスクを形成した。各層の層厚はそれぞれ300Å、1000Å、300Åとした。この金属マスクを用いて、ピロリン酸中において150℃、84分の条件で2回目のプロトン交換処理を行った。

【0064】次に、上層のTa層をフッ酸と硝酸の混合液（比率1：2）でエッチング除去した後、大気中において370℃、60分間の条件でアニール処理を行った。その後、Au層をKIとIとH₂Oの混合液でエッチング除去した後、Ta層をフッ酸と硝酸の混合液（比率1：2）でエッチング除去した。

【0065】次に、真空中またはフロリナート中で、電極に、電極間ギャップ400μmの時3kVの高電圧を1～10秒間印加して分極反転を行った。得られた波長変換素子の両端を光学研磨した。特に、出射側端面26は基本波が再入射するのを防止するために傾斜角度3～7°の斜めカットとした。最後に、入射側端面30及び出射側端面26に、基本波に対する反射率が0.2%以下になるようにSiO₂単層薄膜からなるARコートを作成した。

【0066】完成した波長変換素子に、半導体レーザを用いて波長950nmのレーザビーム（基本波）を入力すると、9mW以上の波長475nmの青色光（第2高調波）の出力が得られた。第2高調波への変換効率を調べたところ、第1の領域での第2高調波への変換効率は300%/Wcm²であり、第1の領域から第2の領域に入射する際のモード変換ロスは70%である。従って、第1の領域及び第2の領域を通しての第2高調波への変換効率は90%/Wcm²となる。

【0067】また、波長変換素子から出射した第2高調波のNFPにおける基板と垂直な方向のビーム形状は、図9（A）に実線で示すように、ガウス分布を示した。

（実施例4）第2の領域の長さLを種々変えた以外は実施例1と同様の構成の波長変換素子を作製し、図14に示すように、波長変換素子の光出射側にNA0.5のレンズAとアパーチャBとを配置して出射する第2高調波を集光し、各波長変換素子の迷光レベルを計測した。ここでいう迷光レベルとは、図15（B）に示す通り、出力光のピーク強度P1に対するバックグラウンドの光強度P2のレベルであり、10×Log（P2/P1）で表される。

【0068】図15（A）に第2の領域の長さLと迷光レベルとの関係を示す。迷光レベルは実用上-10dB以下とすることが必要であり、-15dB以下がより好ましい。従って、図15（A）から第2の領域の長さLは0.5mm以上が好ましく、0.75mm以上がより

好ましいことが分かる。

【0069】第2の領域と第1の領域との接合部において、第2の領域から第1の領域に変換されなかった光は、空間または波長変換素子中に放射される。この放射光は迷光となり実際に使用する光に重なってしまう。このため従来は波長変換素子から出射した光をレンズを介して結像させる際に、迷光により生じた不要部分をアパーチャでカットしていた。しかしながら、上記接合部と素子端面とが近すぎると、ビームが分離されず迷光がオフセットする、という問題がある。上記迷光レベルはそのオフセットの程度を表すものであり、迷光レベルが-10dBより大きいと、即ち、第2の領域の長さLが0.5mm未満では、迷光のオフセットが多く実用上好ましくない。なお、実用上問題の無い迷光レベルとなるように、第2の領域の長さLを選択することによりアパーチャは不要となる。

【0070】

【発明の効果】本発明の光波長変換素子は、高い波長変換効率で、安定してガウシアンビーム状の波長変換波を得ることができる、という効果を奏する。

【0071】また、本発明の光波長変換素子の製造方法によれば、本発明の光波長変換素子を容易に製造することができる。

【0072】また、本発明の光波長変換モジュールは、本発明の光波長変換素子を用いているので、外部に位相補償板等の光学素子を設けることなく、高い波長変換効率で、安定してガウシアンビーム状の波長変換波を得ることができ、モジュールの信頼性が向上する、という効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本実施の形態に係る光波長変換素子の概略図であり、(A)は光導波路に沿った断面図、(B)は平面図である。

【図2】本実施の形態に係る光波長変換素子の製造工程を示す図であり、(A)は平面図、(B)は光導波路に沿った断面図である。

【図3】本実施の形態に係る光波長変換素子の製造工程を示す図であり、(A)は平面図、(B)は光導波路に沿った断面図である。

【図4】本実施の形態に係る光波長変換素子の製造工程を示す図であり、(A)は平面図、(B)は光導波路に沿った断面図である。

【図5】本実施の形態に係る光波長変換素子の製造工程を示す図であり、(A)は平面図、(B)は光導波路に沿った断面図である。

【図6】本実施の形態に係る光波長変換素子の製造工程を示す図であり、(A)は平面図、(B)は光導波路に沿った断面図である。

【図7】本実施の形態に係る光波長変換素子の製造工程を示す図であり、(A)は平面図、(B)は光導波路に沿った断面図である。

10 【図8】本実施の形態に係る光波長変換素子の製造工程を示す図であり、(A)は平面図、(B)は光導波路に沿った断面図である。

【図9】(A)は本実施の形態に係る光波長変換素子の出力光のニアフィールドパターンを示す線図であり、(B)は従来の光波長変換素子の出力光のニアフィールドパターンを示す線図である。

【図10】(A)～(C)は本実施の形態に係る光波長変換素子の変形例を示す概略図である。

20 【図11】本実施の形態に係る光波長変換モジュールの平面図である。

【図12】本実施の形態に係る光波長変換モジュールの実装形態を示す側面図である。

【図13】本実施の形態に係る光波長変換モジュールの駆動回路を示す回路図である。

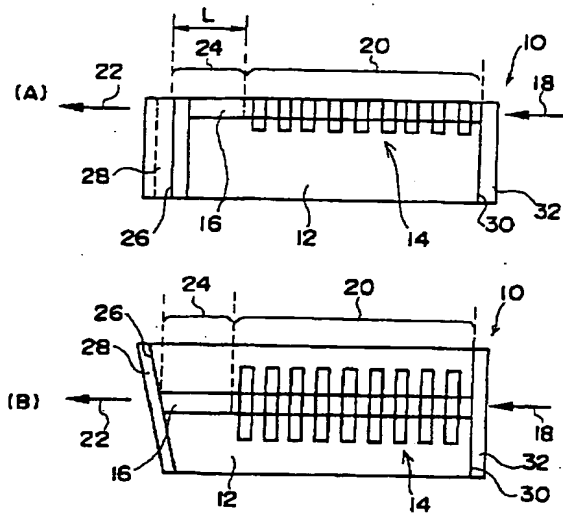
【図14】迷光レベルを計測するための装置構成を示す概略図である。

【図15】(A)は光波長変換素子の第2の領域の長さLと迷光レベルとの関係を示す線図であり、(B)は迷光レベルを説明するための線図である。

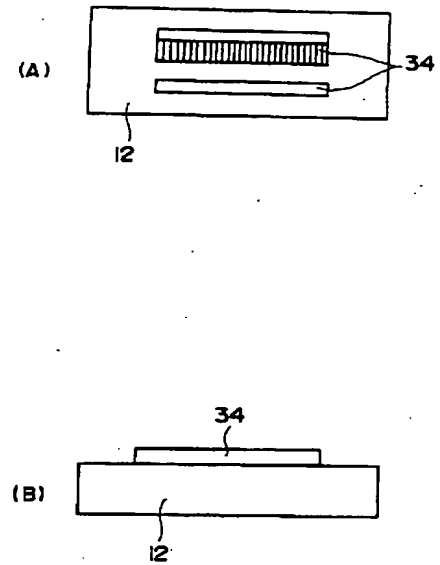
30 【符号の説明】

- 10 光波長変換素子
- 12 基板
- 14 周期ドメイン反転構造
- 16 チャンネル光導波路
- 18 基本波
- 20 第1の領域
- 22 第2高調波
- 24 第2の領域
- 26 出射側端面
- 40 28、32 ARコート
- 30 入射側端面

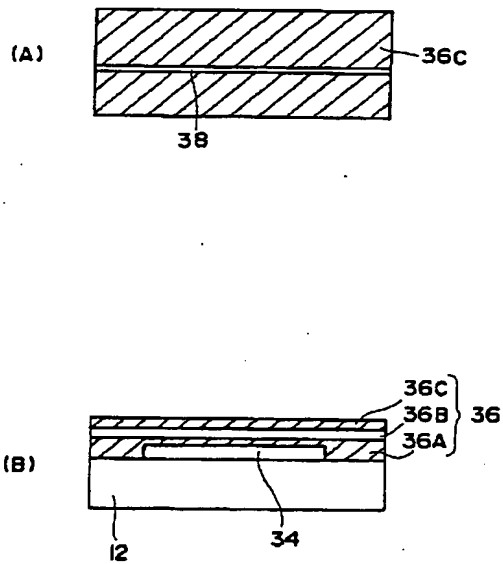
【図 1】



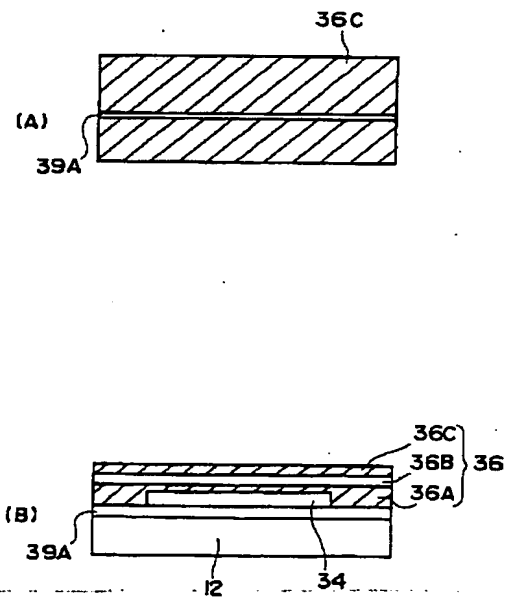
【図 2】



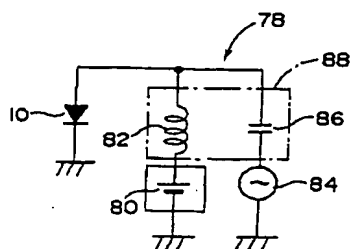
【図 3】



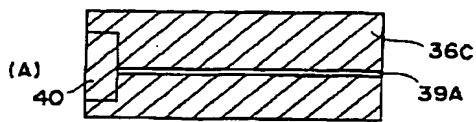
【図 4】



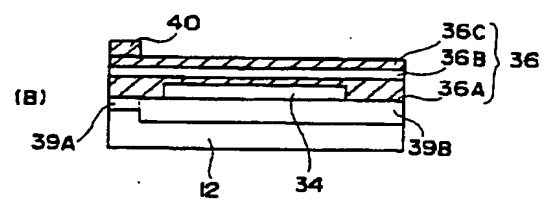
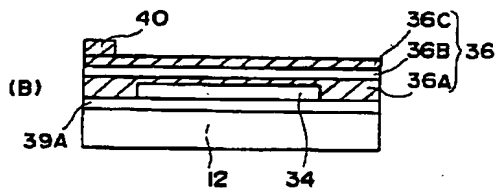
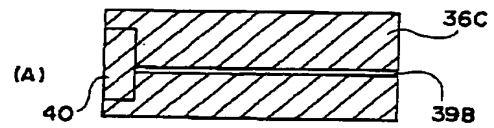
【図 13】



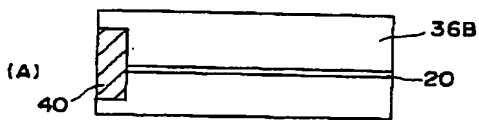
【図5】



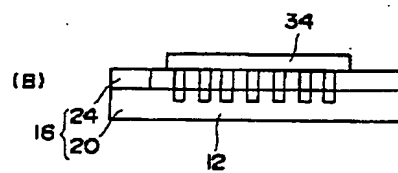
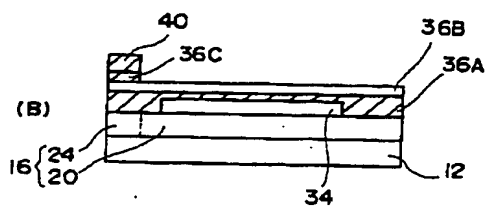
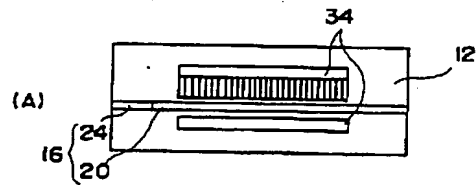
【図6】



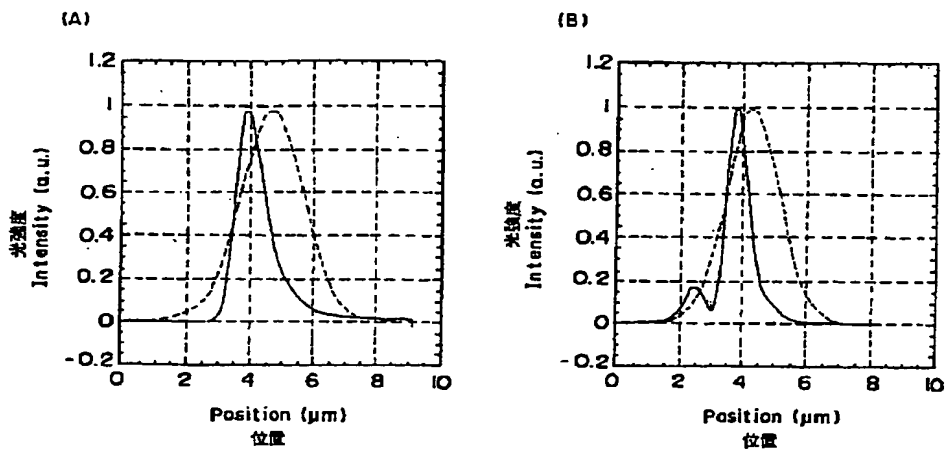
【図7】



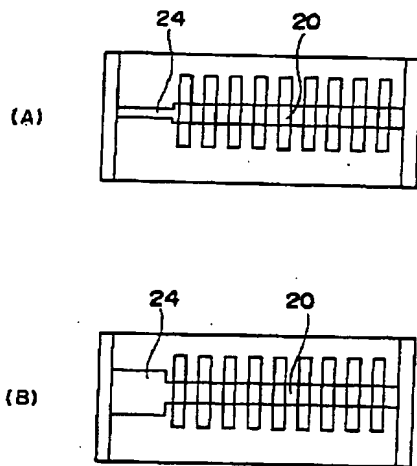
【図8】



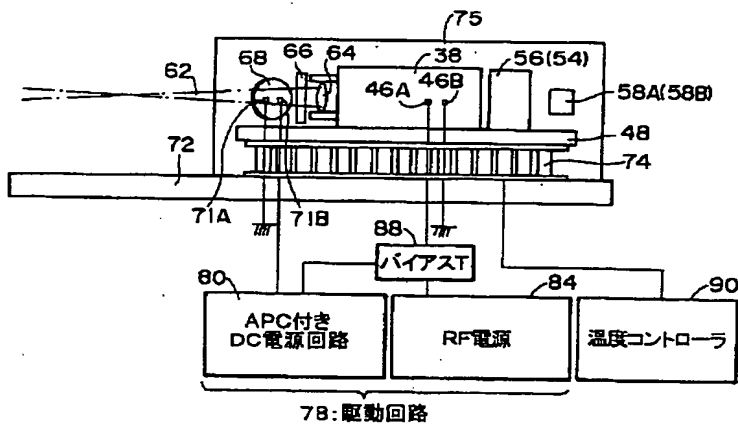
【図9】



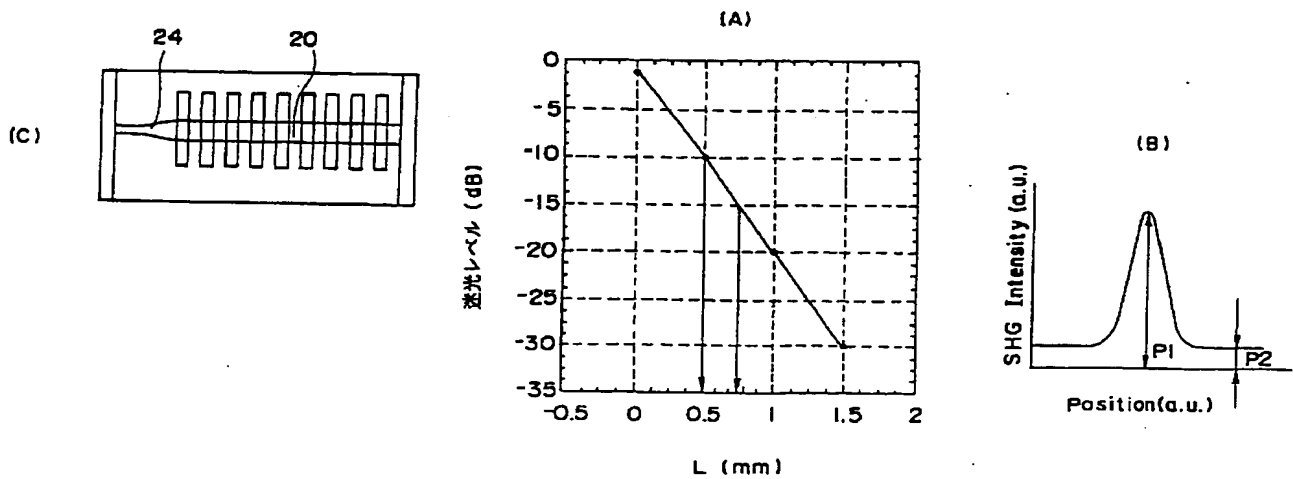
【図10】



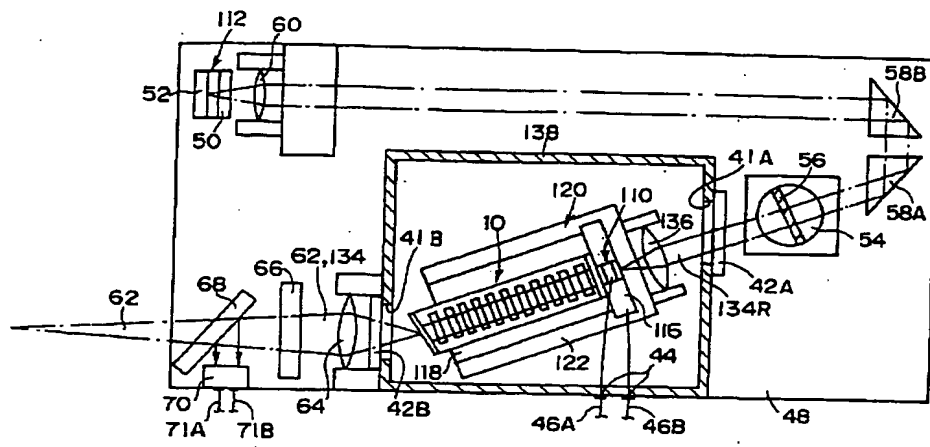
【図12】



【図15】



【図11】



【図14】

